

## 2.2. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

д.ф.-м.н. Д. Ф. Лупишко, д.ф.-м.н. И. Н. Бельская, д.ф.-м.н. Н. Н. Киселев

### Введение

В середине 1970-х годов физические исследования астероидов уже шли полным ходом в США и постепенно начинали проводиться в Европе (Италия, Австрия, Швеция). Становилось очевидным, что астероиды, как и кометы – тела особого интереса и их изучение крайне необходимо, прежде всего, с точки зрения решения космогонических проблем Солнечной системы. Именно это и послужило основным мотивом для начала астрофизических исследований пояса астероидов в НИИ астрономии (тогда – Астрономическая обсерватория Харьковского госуниверситета, АО ХГУ).

В те годы наша обсерватория вела активное сотрудничество с Институтом астрофизики АН Таджикской ССР (Душанбе) в исследованиях Марса в великое (1971 г.) и в последующие близперигелийные противостояния. Такое сотрудничество стало возможным благодаря договоренности между директорами этих учреждений академиками Н. П. Барабашовым и П. Б. Бабаджановым, а осуществлялось непосредственно сотрудниками Д. Ф. Лупишко (АО ХГУ) и Н. Н. Киселевым (в то время – Институт астрофизики). По нашей инициативе в 1977 году эти два учреждения Советского Союза, понимая важность и возрастающую необходимость физических исследований астероидов, решили объединить свои усилия и начать совместные систематические работы по фотометрии и поляриметрии астероидов. Сотрудничество было оформлено договором, опирающимся на использование благоприятного астроклимата в Средней Азии, имеющейся аппаратуры и опыта фотоэлектрических наблюдений слабых объектов (звезд, комет) в Институте астрофизики, с одной стороны, и накопленного в АО ХГУ опыта планетных исследований, с другой.

Совместные наблюдения астероидов в рамках договора были начаты летом 1977 г. на 70-см рефлекторе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории Ин-та астрофизики в фотометрической системе UBV с использованием одноканального фотометра, работающего в режиме счета фотонов. Первоначально наблюдения были ориентированы на изучение фазовых зависимостей блеска и цвета астероидов в максимально доступном для наблюдений с Земли диапазоне фазовых углов, а также на изучение параметров вращения и формы астероидов по их кривым блеска. Эти направления исследований остаются весьма актуальными и сегодня. Хочется отметить, что первая публикация начавшихся исследований называлась «Оппозиционный эффект малой планеты 17 Фетида» (Лупишко и др., 1979), то есть была посвящена проблеме, которая очень активно разрабатывается в настоящее время, причем НИИ астрономии является в этом направлении одним из лидеров.

В работе принимали участие сотрудники Института астрофизики Киселев Н. Н., Чернова Г. П., Тупиева Ф. А. и сотрудники АО ХГУ Лупишко Д. Ф., Бельская И. Н., Величко Ф. П. Этой группой было опубликовано около полутора десятка статей по фотометрии астероидов главного пояса (см. Библиографию), которые содержат кривые блеска и фазовые зависимости блеска и цвета астероидов; измеренные амплитуды оппозиционных эффектов; оценки альбеда, диаметров и вытянутости формы; скорость, направление вращения и ориентацию осей вращения астероидов в пространстве.

Параллельно с наблюдениями в ГисАО, Величко Ф. П. и Шевченко В. Г. в 1983 – 1985 г.г. начали регулярные фотометрические наблюдения астероидов на Чугуевской наблюдательной станции АО ХГУ с использованием такого же 70-см рефлектора АЗТ-8, как и в Душанбе, и аналогичного электрофотометра АФМ-6. Проведение согласованных наблюдений в двух местах значительно повышало эффективность наших исследований. Кроме того, в это же время были начаты поляриметрические наблюдения астероидов, которые осуществлялись в тесном сотрудничестве трех обсерваторий – АО ХГУ, Ин-та астрофизики

в Душанбе и Крымской астрофизической обсерватории (Шаховской Н. М. и Ефимов Ю. С.). В Крыму использовались 1,25 м рефлектор АЗТ-11 и пятицветный UBVR<sub>I</sub>-поляриметр, что позволило начать программу изучения спектральной зависимости параметров поляризации астероидов. В 1992 г. сотрудниками АО ХГУ (Круглый Ю. Н. и др.) начаты фотоэлектрические наблюдения астероидов на 60-см и 1-м телескопах на горе Кошка в Симеизе, а с 1996 г. – с ПЗС-камерой ST-6, которые выполняются в рамках сотрудничества с КрАО (Гафтонюк Н. М.).

С введением в строй 1 м телескопа Цейсса обсерватории Санглок Ин-та астрофизики Тадж. ССР наблюдения астероидов по совместным программам стали проводиться и на Санглоке (с 1984 г. – поляриметрия и с 1989 г. – фотометрия). Однако из-за распада Советского Союза наше сотрудничество с таджикскими коллегами, к сожалению, в 1991 – 1992 г.г. прекратилось. Стоит отметить также такой печальный факт, что из-за военных действий в то время в районе обсерватории Санглок 1 м телескоп прекратил свое функционирование.

Постепенно складывалось сотрудничество с зарубежными коллегами США и Европы. В 1995 г. в рамках договора о сотрудничестве с Институтом планетных исследований в Берлине (DLR, Германия) была получена ПЗС-камера ST-6 UV вместе с программным обеспечением. Внедрение ее в практику фотометрических наблюдений астероидов на Чугуевской наблюдательной станции АО ХГУ существенно повысило наши наблюдательные возможности. В настоящее время кроме этой камеры для фотометрии астероидов и комет используются также камера IMG 1024S (американская фирма FLI), полученная в 2001 г. в качестве гранта Американского Планетного Общества, и камера FLI 47-10, приобретенная в 2006 г. вместе с приемником GPS по INTAS-гранту.

Научные интересы нашей группы не ограничивались только объектами главного пояса, а постепенно все больше и больше охватывали астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Этому способствовало в значительной мере не только их периодические тесные сближения с Землей (а значит, возможность наблюдения очень малых астероидов, причем в широком диапазоне фазовых углов), но и растущее понимание во всем мире реальности астероидно-кометной опасности и перспектив освоения астероидов как источника металлов и другого минерального сырья в околоземном космическом пространстве. С приходом в группу 1988 г. выпускника нашего университета Круглого Ю. Н. (работавшего до этого по распределению в Физико-техническом институте АН Туркменской ССР) фотометрические исследования АСЗ значительно активизировались. Кроме того, в январе 1995 г. в состав нашего отдела был зачислен Н. Н. Киселев – сотрудник Ин-та астрофизики Таджикской ССР, известный уже в то время специалист по фотометрии и поляриметрии комет, который три последних года работал с доктором К. Йокерсом в Институте исследования тел Солнечной системы им. Макса Планка в Германии. С этого времени исследования комет прочно вошли в научную тематику нашего отдела, который официально начал свою историю с 1993 г. как отдел физики астероидов (сейчас – отдел физики астероидов и комет).

Обнаружение и изучение тел пояса Койпера в последние годы становится все более и более актуальным, поскольку понимание природы этой новой популяции объектов непосредственно связано с пониманием происхождения комет и их связи с астероидами, с определением структуры и эволюции Солнечной системы, ее границ и др. Эта тематика, которую успешно ведет И. Н. Бельская в сотрудничестве с зарубежными коллегами, в последние 2-3 года тоже нашла свое место в наших исследованиях.

Подводя итог краткого исторического экскурса, стоит отметить, что становление тематики исследований астероидов в АО ХГУ (как и в целом в стране) не было простым. Во-первых, это довольно слабые объекты для тех телескопов, на которых мы могли наблюдать астероиды, а во-вторых, не было необходимой зарубежной литературы, где публиковались результаты их исследований, и не было специалистов, занимающихся непосредственно исследованиями физики астероидов. По этой причине много усилий было затрачено на организационную деятельность, направленную на инициирование исследований астероидов в других обсерваториях СССР. Так, в 1981 г. и в 1983 г. в АО ХГУ было проведено два Всесоюзных семинар-совещания по физическим исследованиям астероидов, в которых участвовали 19 человек (9 учреждений) и 28 человек (14 учреждений), соответственно. В 1984 г. решением секции «Солнечная система» Астросовета АН СССР была организована новая постоянно действующая Рабочая группа «Астероиды» с определением в качестве координирующей организации АО ХГУ (председатель РГ – Д. Ф. Лупишко, ученый секретарь

– И. Н. Бельская). Рабочая группа, в состав которой входило 22 человека, представляющих 14 астрономических учреждений страны, координировала исследования по данной тематике. Она просуществовала почти 10 лет и была распущена в связи с распадом Советского Союза и ликвидацией Астросовета. За это время было проведено пять заседаний РГ на базе тех учреждений, где исследования астероидов уже проводились или только зарождались – в Харькове, Душанбе, Баку, Киеве и Одессе. В июне 1994 г. в АО ХГУ проходила конференция по физике Луны и планет, посвященная 100-летию со дня рождения академика Н. П. Барабашова, в которой приняли участие около половины членов РГ «Астероиды». Тогда и было принято решение о самороспуске РГ.

Однако исследования малых тел Солнечной системы в НИИ астрономии ХНУ успешно продолжаются. В данном обзоре кратко описаны наиболее важные результаты, полученные на протяжении их относительно короткой 30-летней истории.

## Астероиды

Как уже упоминалось, началом наших исследований астероидов были фотометрические наблюдения. Фотометрия – это один из наиболее эффективных методов исследований, который обеспечил огромный объем данных об альбедо и размерах, форме и вращении, оптических и структурных свойствах астероидов и других малых тел Солнечной системы. Вклад фотометрического метода является решающим в таких направлениях, как определение формы и параметров вращения астероидов, изучение оптических свойств их поверхностей, в обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов. До начала радарных наблюдений фотометрия была единственной возможностью для изучения формы и осевого вращения астероидов, основанной на наблюдениях их кривых блеска, то есть вариаций блеска астероидов, связанных с их осевым вращением.

На рис. 2.2.1 и 2.2.2 приведены результаты UBV-фотометрии крупнейшего астероида М-типа 16 Психея в две оппозиции (Lupishko and Belskaya, 1983). Как видно из рис. 2.2.1, в 1978 г. амплитуда кривой блеска астероида была практически нулевой, в то время как в 1979 г. она составляла 0,32 зв. вел. Это означает, что в 1978 г. астероид наблюдался со стороны полюса, то есть в направлении его оси вращения, и координаты полюса астероида были близкими к координатам самого астероида в этот момент. Поскольку эклиптические долготы Психеи в эти две оппозиции отличались почти ровно на  $90^\circ$ , то в 1979 г. астероид наблюдался со стороны экватора (угол аспекта равен примерно  $90^\circ$ ), амплитуда кривой блеска его была максимальной и соответствующей соотношению полуосей  $a:b=1,34$ . Кроме того, в 1978 г. при видимости со стороны полюса астероид был ярче примерно на 0,4 зв. вел. (см. рис. 2.2.2). Это означает, что в 1978 году наблюдалось большее поперечное сечение астероида, чем в 1979 году. С одной стороны, различие в звездных величинах при этих двух аспектах (со стороны полюса и со стороны экватора) дает соотношение полуосей  $b:c$ , а с другой – максимальный блеск астероида со стороны полюса указывает на то, что астероид вращается вокруг наименьшей оси  $c$ , сохраняя максимальным момент инерции и минимальной энергию вращения (Lupishko and Belskaya, 1983). Сейчас мы знаем, что так вращается подавляющее большинство астероидов (так называемое «principal axis rotation»), однако 30 лет назад это было не столь очевидным, и одно из первых подтверждений такого вращения было получено нами по данным фотометрии.

Кривые блеска конкретного астероида, полученные при разных эклиптических долготах, содержат очень ценную информацию о его векторе вращения (то есть о скорости, направлении вращения и ориентации оси вращения в пространстве), о форме астероида, распределении альбедо по поверхности и даже об оптических свойствах самой поверхности. Методы определения этих параметров подробно описаны в кандидатских диссертациях Ф. П. Величко (1991) и аспирантки из Монголии Тунгалаг Намхай (Тунгалаг, 2003), и частично в обзоре (Лупишко и др., 2007). Отметим, что Ф. П. Величко в свое время внес существенный вклад в разработку методов определения параметров вращения и формы астероидов на основе анализа их кривых блеска (Е-метод для АСЗ и ЕАМ-метод для астероида главного пояса 354 Элеонора, см. (Лупишко и др., 1981, Lupishko and Velichko, 1990)). Недавно В. Г. Шевченко и Н. Тунгалаг предложили новую версию комбинированного метода определения параметров вращения и формы астероидов с использованием фазовой функции Шевченко (19976) и закона рассеивания света Акимова (1988) как наиболее соответствующих рассеивающим свойствам поверхностей астероидов. Этим

методом были определены координаты полюсов, параметры вращения и форма 39 астероидов, из них для 21 – впервые (Тунгалаг и др., 2002, 2003). В последние годы фотометрические наблюдения астероидов главного пояса с целью определения их периодов вращения и формы активно проводит В. Г. Черный, который пришел в наш отдел в 1991 г.

В настоящее время число астероидов с известными периодами вращения составляет около 2000, а с определенными координатами полюсов, сидерическими периодами, направлением вращения и соотношениями полуосей превышает 200. Вклад Харьковской астероидной группы составляет около 10% в определение периодов вращения и около 20 % – в определение вектора вращения и соотношения полуосей астероидов. Все эти данные представляются очень ценными как для изучения индивидуальных астероидов, так и для выполнения статистического анализа по изучению вращения и формы астероидов в целом. В частности, анализ пространственного распределения полюсов астероидов показал (рис. 2.2.3), что анизотропия в распределении широты полюсов имеет место только для объектов с прямым вращением ( $\sin\beta_0 > 0$ , где  $\beta_0$  – эклиптическая широта полюса), а для астероидов с обратным вращением распределение почти изотропное. При этом степень анизотропии возрастает с размером астероидов (Тунгалаг и др., 2003). Отношение числа астероидов с прямым и обратным вращением возрастает с их диаметром от 1:1 среди малых астероидов ( $D < 50$  км) до примерно 1,5:1 среди промежуточных размеров ( $50 < D < 125$  км) и до около 2:1 среди больших ( $D > 125$  км). Таким образом, среди малых астероидов направление вращения является равновероятным, а для крупных тел преобладает изначальное прямое. Эти выводы имеют космогонический характер и свидетельствуют в пользу интенсивной столкновительной эволюции в поясе астероидов в постаккреционный период.

Изучение фазовых зависимостей блеска и цвета астероидов и их оппозиционного эффекта – одна из основных программ исследований астероидов в НИИ астрономии (Шевченко, 1997б, Belskaya et al., 2003, Shevchenko et al., 1997, Shevchenko et al., 2002). Для аппроксимации фазовых зависимостей блеска обычно использовались HG-функция, а также функции Хапке и Люмме-Боуэлла. Однако в силу ряда ограничений их применение было связано с рядом трудностей и не всегда приводило к адекватному описанию этих зависимостей. В своей диссертационной работе В. Г. Шевченко (1997а) предложил новую эмпирическую функцию, которая с точностью до ошибок наблюдений аппроксимирует поведение блеска в диапазоне фазовых углов  $\alpha = 0 \div 40^\circ$  и гораздо лучше описывает область оппозиционного эффекта по сравнению с наиболее часто применяемой HG-функцией. Она имеет следующий вид:

$$V(1, \alpha) = V_0 - \frac{a}{1 + \alpha} + b\alpha, \quad (1)$$

где:  $V_0$  – звездная величина астероида при  $\alpha=0$  на единичном расстоянии от Земли и Солнца за вычетом величины оппозиционного эффекта;  $a$  – параметр, характеризующий амплитуду ОЭ;  $b$  – параметр, характеризующий линейный участок фазовой зависимости. Эти три неизвестные легко определяются методом наименьших квадратов. Следует отметить, что второе слагаемое зависимости (1) описывает только оппозиционный эффект, и его вклад на линейном участке не превышает нескольких процентов. Третье слагаемое соответствует обычному выражению для линейного участка с фазовым коэффициентом  $\beta$ .

На рис. 2.2.4 приведена зависимость фазового коэффициента  $\beta$  от геометрического альбедо астероидов  $p_v$ , полученная в работе (Belskaya and Shevchenko, 2000). Если альбедо представить в логарифмической шкале, то эта зависимость принимает линейный вид:

$$\beta = -0,026 \lg p_v + 0,011. \quad (2)$$

Обратная зависимость фазового коэффициента (т.е. наклона фазовой зависимости блеска) от альбедо обусловлена тем, что с уменьшением последнего увеличивается поглощательная способность частиц поверхности, а также возрастает роль взаимных затенений между частицами/элементами поверхности, вследствие чего наблюдается более быстрый спад блеска астероида с возрастанием фазового угла. Эта зависимость представляется очень важной, поскольку дает возможность оценивать альбедо астероида (а, значит, грубо и его тип) по одним только фотометрическим измерениям.

Анализируя все имеющиеся данные по ОЭ астероидов, полученные в основном Харьковской астероидной группой, Бельская и Шевченко (Belskaya and Shevchenko, 2000)

показали, что в отличие от фазового коэффициента амплитуда оппозиционного эффекта (ОЭ) имеет более сложную зависимость от альбеда (рис. 2.2.5). Максимальную амплитуду ( $0,27 \pm 0,42$  зв. вел.) имеют среднеальбедные астероиды S и M-типов, минимальную – низкоальбедные C, G, P и F-астероиды. Кроме того, низкоальбедные астероиды демонстрируют большое разнообразие величины (от 0,05 до 0,23 зв. вел.) и формы ОЭ. В целом, амплитуда оппозиционного эффекта зависит от альбеда неоднозначно и имеет максимум при альбеде  $p_v = 0,20$ . Таким образом, астероиды разных таксономических классов имеют разную величину и форму ОЭ, и это является важным результатом для понимания механизмов формирования ОЭ и для изучения различий в структуре и составе астероидных поверхностей. В настоящее время известны два механизма формирования ОЭ – это когерентное усиление обратного рассеяния света и теневой эффект. Их относительный вклад разный для разных типов объектов: для низкоальбедных преобладает теневой эффект, а для высокоальбедных (E-тип) – когерентное усиление обратного рассеяния. В то же время, для среднеальбедных объектов оба механизма существенны, и, возможно, по этой причине они показывают наибольшую амплитуду ОЭ.

Таким образом, изучение фазовых зависимостей блеска и оппозиционных эффектов необходимо, прежде всего, для понимания процессов рассеивания света реголитами безатмосферных космических тел. Кроме того, фазовые зависимости и величины ОЭ необходимы для вычисления абсолютных звездных величин этих объектов, которые, с одной стороны, являются основой для определения их альбеда и диаметров, а с другой – основой для эфемеридных вычислений видимого блеска.

Для решения многих задач необходимо иметь фотометрическую модель астероида, которая учитывает форму тела, наиболее близкую к реальной, распределение яркости по поверхности и фазовую функцию. Такая модель была создана и постоянно улучшается В. Г. Шевченко (1997а). Она предусматривает произвольную форму тела, в том числе и невыпуклую; произвольное распределение альбеда по поверхности; произвольные закон рассеивания света поверхностью и фазовую функцию. Модель дает возможность получать кривые блеска астероидов произвольной формы для любого угла аспекта и вычислять их блеск в наблюдаемом диапазоне фазовых углов. Она использовалась для проверки различных законов рассеяния света с целью определения наиболее соответствующего реальному распределению яркости по поверхности астероидов (Акимов и др., 1992). Она также широко применяется для определения координат полюсов, формы астероидов, обычно аппроксимируемой трехосным эллипсоидом с полуосями  $a > b > c$  (Тунгалаг и др., 2002; 2003).

Важным направлением в настоящее время является обнаружение и изучение двойных систем среди астероидов и объектов пояса Койпера. Вслед за открытием первого спутника Дактиль у астероида главного пояса 243 Ида, сделанного по прямым изображениям с КА «Галилео» в 1993 году, последующие открытия двойных астероидов начались уже в 1994 – 1995 г.г., причем фотометрическим методом с помощью наземных телескопов. В настоящее время обнаружение двойных систем выполняется с использованием адаптивной оптики на крупных наземных телескопах, радарным методом, получением прямых изображений с помощью космического телескопа Хаббла и фотометрическим методом, то есть в результате анализа кривых блеска объекта. В качестве примера использования фотометрии можно привести обнаружение двойственности у малого астероида главного пояса 11264 Клаудиомаконе (Krugly et al., 2007). Наблюдения его были проведены в течение 9 ночей на Чугуевской наблюдательной станции и в КрАО (г. Симеиз). Полученные индивидуальные кривые блеска указывали на возможную 3-х часовую периодичность блеска, однако они имели нерегулярную форму с дополнительными минимумами, депрессиями и др. аномальными ослаблениями блеска. Было предположено, что эти особенности обусловлены возможной двойственностью астероида. Используя части кривых блеска без нерегулярных депрессий и ослаблений блеска, удалось получить по всей совокупности данных короткопериодическую кривую блеска. После ее вычитания из наблюдений остаточные вариации хорошо согласовались с периодом  $P_2 = 15,11$  часа и дали долгопериодическую кривую вариаций блеска, которая выглядит подобно кривой на рис. 2.2.7 (см. стр. 217) и действительно указывает на двойственность этого астероида. Анализ обеих кривых позволяет оценить основные параметры системы: период вращения первичного тела  $P_1 = 3,1872 \pm 0,0006$  часа, орбитальный период вторичного тела  $P_{orb} = 15,11 \pm 0,01$  часа, отношение диаметров тел  $d_1/d_2 \geq 0,31$ , отношение радиуса орбиты к диаметру первичного тела  $r_{orb}/d_1 = 1,5 \pm 0,2$ , объемная плотность первичного тела  $\rho_p \geq 1,2$  г/см<sup>3</sup>. Кроме того, на основе измеренного пока-

зателя цвета V–R определен тип астероида, и по его среднему альбедо определены эффективный диаметр астероида (4,2 км) и диаметры компонент (4,0 и 1,24 км) (Krugly et al., 2007).

Как было показано в работе (Лупишко и др., 2007), параметры обнаруженных 28 двойных систем среди AC3 подобны между собой (что может указывать на то, что системы с такими параметрами динамически наиболее стабильны или же это свидетельство в пользу одного и того же механизма их происхождения). В то же время, среди астероидов главного пояса наблюдается большое разнообразие двойных систем. Так, размер Дактиля составляет всего 1.4 км при размере первичного тела 243 Ида – 60×25×19 км. Совсем другой пример – двойная система 90 Антиопа, открытая в 2000 г., представляет два одинаковых по размерам компонента диаметром  $D = 85$  км, удаленных друг от друга на расстояние  $2D$ . Фотометрические наблюдения этой системы в течение нескольких оппозиций в рамках сотрудничества с доктором Т. Михаловским (Познаньская обсерватория, Польша) провел Ф. П. Величко. Полученные данные позволили существенно уточнить параметры двойной системы и определить координаты ее полюса:  $\lambda_0 = 17 \pm 5^\circ$  и  $\beta_0 = 25 \pm 5^\circ$  (Michalowski et al., 2004).

Астероиды групп Амура, Аполлона и Атона, т.е., астероиды, сближающиеся с Землей (AC3), представляли для нас интерес с самого начала наших исследований, а в последние 12–15 лет фотометрия AC3 стала одной из основных наших программ. Эти объекты, как известно, периодически тесно сближаются с Землей и поэтому имеют быстрое угловое перемещение по небу, вследствие чего представляют определенную сложность для точной фотометрии. Ю. Н. Круглый как основной исполнитель программы провел анализ точности фотометрических измерений быстро движущихся астероидов на ПЗС-снимках, разработал методику наблюдений и редукции ПЗС-снимков таких объектов и создал необходимое программное обеспечение (Krugly et al., 2002, Круглый, 2003, 2004). К настоящему времени получено более 500 кривых блеска примерно 130 AC3, на основе которых получены новые данные о размерах, форме, периодах осевого вращения и оптических свойствах поверхностей нескольких десятков AC3. Измерены периоды вращения около 80 AC3, причем для 50 из них – впервые. Определены фотометрические диаметры около 65 AC3. Несколько объектов наблюдались в широком диапазоне углов аспекта и фаз в рамках международного сотрудничества, что позволило построить физические модели шести из них (Magnusson et al., 1996, Mottola et al., 1997, Kaasalainen et al., 2004). Для трех AC3 получены фазовые зависимости блеска до предельно малых углов фаз (меньше  $1^\circ$ ). В частности, фазовая кривая блеска AC3 433 Эрос, полученная Ю. Н. Круглым и В. Г. Шевченко в диапазоне фазовых углов  $\alpha = 0,3\div 31^\circ$  (Krugly and Shevchenko, 1999), была использована коллегами США для калибровки результатов измерений с борта КА миссии NEAR-Shoemaker к Эросу. В целом, научные проблемы изучения AC3 остаются теми же, что и для астероидов главного пояса, но дополняются также астрометрическими наблюдениями, необходимыми для уточнения орбит вновь открытых AC3. Такие наблюдения были начаты нами в рамках Европейской программы обнаружения опасных AC3 *EUNEASO*, направленной на решение проблемы «Астероидная опасность».

Результаты исследований по этой программе опубликованы во многих статьях совместно с зарубежными коллегами и послужили основой кандидатской диссертации Ю. Н. Круглого (2004). Среди них стоит отметить результаты фотометрии астероида группы Аполлона 4179 Тоутатис ( $D \sim 3$  км) в период его тесного сближения с Землей в 1992 – 1993 г.г. Работа выполнялась в рамках международной программы с участием 26 обсерваторий. Была получена фазовая зависимость блеска Тоутатиса в диапазоне фазовых углов  $\alpha = 0,3\div 33^\circ$  и кривая вариаций его блеска с периодом 176 час и амплитудой 1,15 зв. вел. (Круглый и др., 1993, Spencer et al., 1995). Совместный анализ радарных и фотометрических данных показал, что астероид имеет очень сложное вращение, причем не вокруг самой короткой оси (non-principal axis rotation). Сейчас известно около 12 других астероидов, сближающихся с Землей, с таким вращением, их обычно называют «tumbling asteroids». Таким образом, в отличие от Психеи (см. выше) Тоутатис представляет собой совершенно другой пример астероидного вращения: сейчас уже хорошо известно, что он вращается вокруг самой длинной оси с периодом 129,8 часа, которая прецессирует с периодом 176,4 часа. Как заметили наши американские коллеги, Харьковская группа получила наиболее точное значение этого периода (Spencer et al., 1995).

На рис. 2.2.6 представлена диаграмма зависимости периодов вращения AC3 от их абсолютных звездных величин, построенная Ю. Н. Круглым (2003) и обновленная по последним данным. Она указывает на существование некоторого предела вращения или

«барьера» для скоростей выше, чем 11 об/сутки. Более четко этот барьер был показан в работе [1] на диаграмме, включающей не только АСЗ, но и астероиды главного пояса, такие как «rubble pile spin barrier». Он подразумевает, что при такой скорости вращения центробежная сила на экваторе тела становится равной силе гравитационного притяжения для почти сферического тела типа «rubble piles» (груда камней) с ожидаемой для астероидов плотностью  $2 \div 3 \text{ г/см}^3$ . Существование этого барьера предполагает, что даже такие малые астероиды могут иметь структуру груды камней без существенных сил сцепления. Диаграмма (рис. 2.2.6) указывает также на существование еще одного критического предела, соответствующего абсолютной звездной величине  $H = 21,5$ , которая при среднем альбедо АСЗ, полученном при учете эффектов наблюдательной селекции  $p_v = 0,14 \pm 0,02$  [2], соответствует диаметру тела  $D = 180 \text{ м}$ . Тела, меньше этого размера, выдерживают очень быстрое вращение, то есть они являются монолитными телами с большими силами внутреннего сцепления. Таким образом, можно утверждать, что область, где существуют слабо консолидированные тела со структурой типа «rubble piles», на диаграмме «период вращения – диаметр» лежит в области  $P \geq 2,2 \text{ часа}$  и  $D \geq 180 \text{ м}$ .

С 1993 года фотометрия АСЗ в нашем отделе ведется в рамках Договора о сотрудничестве с Крымской астрофизической обсерваторией, где эту работу выполняет на 1-м рефлекторе Цейсса (Симеиз) выпускница ХГУ Гафтонюк Н. М. С 2000 года она проводит регулярные ПЗС-наблюдения АСЗ по согласованной с Ю. Н. Круглым программе, и в 2006 году защитила кандидатскую диссертацию [3]. С 1995 г. Ю. Н. Круглый активно сотрудничает в фотометрии АСЗ с П. Правецом (Чехия, Онджеевская обсерватория). Совместные наблюдения кривых блеска АСЗ дали им возможность обнаружить и исследовать несколько двойных астероидов среди объектов этой популяции. На рис. 2.2.7 в качестве примера приведена долгопериодическая компонента кривой блеска АСЗ 1996 FG3, полученная с участием сотрудников отдела Ю. Круглого, Ф. Величко, В. Шевченко и В. Черного, которая четко указывает на двойственность этого астероида.

В вопросе о происхождении АСЗ в настоящее время нет особых разногласий. Считается, и не без оснований, что основной источник пополнения этих тел – это астероиды главного пояса. Некоторые расхождения имеют место лишь в оценке доли АСЗ кометного происхождения (ядра комет, исчерпавших свою активность). Всего 15 лет назад диапазон оценок этой доли включал весь спектр возможных значений – от большинства АСЗ, как утверждал Е. Эпик в 1963 г., до 40% (Дж. Везерилл в 1988 г. и Р. Бинзел в 1992 г.), и вплоть до нуля («... если кометные ядра и встречаются среди АСЗ, то крайне редко», – Э. Тедеско и Дж. Градье в 1988 г.). Однако новые оценки, появившиеся в 2001 г. и позже, гораздо лучше согласуются между собой. Лупишко Д. Ф. и Лупишко Т. А. (2001) провели сравнительный анализ физических свойств и минералогии АСЗ, астероидов главного пояса и, частично, ядер комет и пришли к выводу, что главный пояс астероидов является доминирующим источником пополнения АСЗ-популяции, а доля АСЗ кометного происхождения не превышает 10%. Этот вывод хорошо согласуется с последними оценками, диапазон которых заключен в пределах  $5 \div 15 \%$  (более подробно вместе со ссылками см. в обзоре Lupishko et al., 2007) и не противоречит динамическим соображениям, согласно которым главный пояс астероидов в состоянии пополнять популяцию АСЗ несколькими сотнями объектов километрового размера в течение 1 млн. лет, что является вполне достаточным для ее сохранения. Подробному описанию физических свойств АСЗ посвящены также обзоры (Lupishko and Di Martino, 1998, Binzel et al., 2002, Lupishko et al., 2007).

Совместные поляриметрические наблюдения астероидов были начаты на Крымской астрофизической обсерватории АН СССР в 1983 г. и на обсерватории Санглок Института астрофизики в Душанбе в 1984 г. Одной из первых была программа поляриметрии СМЕУ-астероидов, предложенная И. Н. Бельской. СМЕУ-астероиды – это объекты С, М, Е-типов и неклассифицированные (unclassifiable) астероиды, которые не были однозначно классифицированы по типам из-за того, что их спектры в видимой области являются плоскими, без заметных полос поглощения, и подобными между собой. В то же время, они почти на порядок различаются по альбедо, к которому весьма чувствительна поляриметрия. Наблюдения были проведены в 1984 – 1987 г.г. на 1-м рефлекторе обсерватории Санглок вместе с сотрудниками Института астрофизики Н. Н. Киселевым и Г. П. Черновой. Использовался одноканальный фотоэлектрический поляриметр с быстрым (33 об/сек) вращением анализатора. В результате из 12-ти наблюденных СМЕУ-астероидов 9 были отнесены к М-типу, интерес к которому уже в то время был довольно высоким. Общее число М-асте-

роидов к 1987 году возросло, таким образом, до 24-х, что дало возможность более уверенно подтвердить их, в среднем, более быстрое осевое вращение по сравнению с С и S-типами (Бельская и др., 1987, 1991).

Изучение фазовых кривых поляризации астероидов главного пояса и сближающихся с Землей – одно из основных направлений нашей поляриметрии. Результаты проведенных наблюдений подтвердили, в частности, уникальные поляриметрические свойства одного из крупнейших астероидов 704 Интерамния – предельно малое на то время значение угла инверсии  $15,7^\circ$  (Лупишко и др., 1994). Полученные впервые фазовые кривые поляризации АСЗ 1036 Ганимед, 1627 Ивар и 1685 Торо позволили оценить с хорошей точностью их альбедо, а также, что очень важно, и величину максимальной положительной поляризации  $P_{\max} = 8,5 \div 10,5\%$  для астероидов S-типа (Киселев и др., 1990, 1994).

Астероиды, сближающиеся с Землей, предоставляют возможность наблюдать объекты в очень широком диапазоне фазовых углов и, в этом смысле, «помогают» нам изучать тела главного пояса, для которых большие фазовые углы при наземных наблюдениях не доступны. В декабре 2001 г. астероид группы Атона (т.е. потенциально опасный с точки зрения возможного столкновения с Землей) 33342 (1998 WT24) прошел от Земли на расстоянии 0,0125 а.е. и был доступен для наблюдений в северном полушарии на небольших телескопах. Одновременные фотометрические и поляриметрические наблюдения были проведены на трех обсерваториях (70-см рефлектор НИИ астрономии, 1,25 м – КрАО и 2.0 м – обсерватории Терскол на северном Кавказе) в течение 9 ночей, в диапазоне фазовых углов  $\alpha = 12 \div 83^\circ$ . Полученные фазовые кривые блеска и поляризации позволили уверенно классифицировать астероид как высокоальбедный объект E-типа и определить его основные характеристики (период вращения, вытянутость формы, альбедо  $p_v = 0,43$ , размеры  $420 \times 330$  м). Вместе с имевшимися данными поляриметрии E-астероидов главного пояса 44 Низа и 64 Ангелина удалось получить полную фазовую кривую поляризации астероидов E-типа в полосе V. Эта кривая показала неожиданно малое значение максимальной положительной поляризации  $P_{\max} = 1,68\%$  (против 8,5% для S-астероида 1685 Торо и 25-30 % для пылевых комет). Максимум оказался на фазовом угле  $\alpha = 72^\circ$  (Kiselev et al., 2002), что тоже необычно. В работе принимали участие сотрудники НИИ астрономии Киселев Н. Н., Величко Ф. П., Лупишко Д. Ф., ГАО НАНУ – Розенбуш В. К., КрАО – Шаховской Н. М., Ефимов Ю. С. и Румянцев В. В., Института астрономии им. М. Планка (Катленбург-Линдау, Германия) – К. Йокерс.

Как уже отмечалось, в 1983 г. началось наше сотрудничество с Крымской астрофизической обсерваторией в поляриметрии астероидов. Сотрудники этой обсерватории Шаховской Н. М. и Ефимов Ю. С. к этому времени внедрили в практику поляриметрических наблюдений 5-ти цветный UBVRi-поляриметр системы Пиирола на 1.25 м рефлекторе АЗТ-11. От АО ХГУ, кроме Д. Ф. Лупишко и И. Н. Бельской, в программе принимал участие также аспирант С. В. Васильев. Нас интересовало изучение спектральной зависимости параметров поляризации астероидов, поскольку раньше такие исследования практически не проводились. Наблюдения были направлены, в основном, на измерение отрицательной поляризации  $P_{\min}$  астероидов разных типов во всех 5-ти спектральных полосах. Общий результат этих исследований сводится к тому, что абсолютная величина отрицательной поляризации средне- и высокоальбедных астероидов S, M, V и E-типов возрастает с длиной волны подобно тому, как это имеет место для каменных метеоритов (обыкновенных и энстатитовых хондритов, ахондритов) и основных породообразующих силикатов. В то же время низкоальбедные астероиды, как и углистые хондриты, показывают обратную зависимость, т.е. уменьшение  $|P_{\min}|$  с длиной волны. Таким образом, характер зависимости определяется типом астероида (т.е. веществом) и имеет качественное сходство с соответствующими метеоритными аналогами (Бельская и др., 1987, 1989, Лупишко, 1998а). Остановимся на некоторых частных результатах этой программы, которые представляют интерес в качестве новых поляриметрических эффектов у астероидов.

В декабре 1992 – январе 1993 г.г. в течение шести ночей были проведены UBVRi-наблюдения довольно крупного ( $D \sim 3$  км) астероида группы Аполлона 4179 Тютатис и получены фазовые зависимости поляризации в диапазоне фазовых углов  $15,8 \div 51,4^\circ$  (Lupishko et al., 1995). Оказалось, что когда значения второго параметра Стокса  $Q = P \cdot \cos 2\theta_r$  большие (три даты с  $\alpha > 30^\circ$ ,  $Q = 1 \div 4\%$ ), параметр U с точностью до ошибок измерений равен нулю. Однако вблизи точки инверсии, где Q по своему значению близок к нулю, третий параметр  $U = P \cdot \sin 2\theta_r$ , наоборот, становится значимым. Три разные даты



наблюдений с  $\alpha = 15,8 \div 18,6^\circ$  показывают, что значение угла  $\theta_r$  отличалось от 0 или  $90^\circ$  и равнялось примерно  $45^\circ$ . При этом эффект проявляется во всех фильтрах, значительно превышая ошибки определения этого угла. Все это свидетельствует об отклонении вектора поляризации от плоскостей, перпендикулярной или параллельной плоскости рассеяния, и может говорить о присутствии поляризации, не связанной с плоскостью рассеяния. Каких-либо других указаний на подобный эффект у безатмосферных космических тел в литературе не обнаружено. Мы воспользовались весьма благоприятной возможностью проверить этот эффект на другом приближающемся к Земле астероиде – 1620 Географ (тоже S-тип), который наблюдали в сентябре 1994 г. на том же телескопе и с тем же поляриметром, и также вблизи точки инверсии (Васильев и др., 1996). Однако заметного отклонения вектора поляризации от плоскости рассеяния, как это имело место у Тоутатиса, не обнаружено. Угол  $\theta_r$  с точностью до погрешностей измерений принимал значения вблизи 0 или  $90^\circ$ . Это дает несколько больше оснований утверждать, что обнаруженный у Тоутатиса эффект реален. Одно из возможных объяснений – это очень сложная форма Тоутатиса, вплоть до двойственности, при которой, в частности, возможна взаимная подсветка компонент отраженным при больших углах и поэтому достаточно сильно поляризованным излучением.

Вариации степени отрицательной поляризации по диску Весты были измерены в США еще в 1970-х годах, а в 1986 г. в рамках программы «Веста-86», инициированной нашей РГ «Астероиды», были подтверждены Н. Н. Киселевым по наблюдениям на Советско-Боливийской обсерватории. Его одновременные измерения блеска и поляризации в полосе V, кроме того, показали четкую обратную корреляцию модуля степени отрицательной поляризации и блеска при вращении астероида вокруг своей оси. В 1990 г. на 1,25-м рефлекторе КрАО были проведены поляриметрические UBVRI наблюдения Весты в течение ее полного оборота вокруг оси (5,342 часа). В полосе V относительные вариации степени поляризации  $\Delta P/P$  оказались равными 0,24 и максимальными, поскольку они были получены при экваториальном аспекте астероида. Хорошо видна обратная корреляция степени поляризации в полосе V с кривой блеска в этой же полосе. Поскольку кривая блеска Весты обусловлена не столько формой, сколько распределением альбедо по поверхности, то обратная корреляция модуля отрицательной поляризации и блеска Весты есть не что иное, как проявление эффекта Умова. Таким образом, на примере Весты видно, что эффект Умова справедлив и для отрицательной поляризации. На рис. 2.2.8 представлен совершенно новый результат (не только для Весты, но для астероидов вообще) – это вариации позиционного угла плоскости поляризации  $\theta$  с вращением астероида вокруг своей оси. Вариации угла  $\theta$  оказались максимальными в полосе U ( $\Delta\theta=8^\circ$ ) и минимальными в полосе I ( $\Delta\theta=2,5^\circ$ ). Характер изменения вариаций по спектру, а также с фазой вращения, свидетельствует в пользу их реальности (цикличность диаграммы параметров Стокса Q и U Весты (Лупишко и др., 1999) подтверждает это). Повторные наблюдения Весты в 1996 г., тоже при экваториальном аспекте, однако, только в полосах UBV и только на протяжении 0,6 периода оборота астероида, подтвердили наличие вариаций с вращением позиционного угла  $\theta$  и дали даже несколько большую их амплитуду. Кроме того, в оба противостояния имеют место систематические отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния в среднем на два градуса. Наблюдаемое поведение угла  $\theta$  объяснено существованием на поверхности Весты линейных, упорядоченно ориентированных структур типа «grooves» (борозды, трещины) и/или склонов, образовавшихся вместе с гигантским кратером ( $D=460$  км), обнаруженным на Весте с помощью космического телескопа Хаббла. Сопоставление вариаций угла  $\theta$  по фазе вращения с топографией Весты, т.е., положением кратера на диске, хорошо согласуется с предложенной гипотезой (Лупишко и др., 1999).

У большинства безатмосферных космических тел, как известно, наблюдается нелинейное возрастание блеска вблизи оппозиции (см. выше) – так называемый фотометрический оппозиционный эффект (ФОЭ). Для некоторых высокоальбедных спутников Юпитера (галилеевых) и Сатурна был найден также поляриметрический оппозиционный эффект (ПОЭ) как вторичный минимум глубиной  $\sim 0,3\%$  на отрицательной ветви фазовой кривой при  $\alpha < 2^\circ$  (Rosenbush et al., 2002). В связи с этим, Киселев Н. Н. совместно с Розенбуш В. К. (ГАО НАНУ) предприняли поиски ПОЭ у высокоальбедных астероидов E-типа главного пояса 44 Низа и 64 Ангелина. Наблюдения Ангелины проводились на 1,25 м рефлекторе АЗТ-11 КрАО в течение трех оппозиций с 1995 по 2001 г.г., а Низы – на телескопах 2,6 м ЗТШ (КрАО) и 0,7 м АЗТ-8 нашего института в августе 2005 г. В результате нескольких попыток искомым

эффект впервые для астероидов был сначала выявлен у 64 Ангелины как вторичный минимум на отрицательной ветви фазовой кривой поляризации глубиной около 0,4%, центрированный на  $\alpha=1,8^\circ$  (Rosenbush et al., 2005), а затем и у 44 Низы. Обнаружение ПОЕ у высокоальбедных спутников и астероидов подтверждает теоретические представления о том, что основным механизмом возникновения оппозиционных эффектов блеска и поляризации у таких тел есть механизм когерентного усиления обратного рассеяния.

Исследованию корреляции фотометрических и поляриметрических характеристик оппозиционных эффектов посвящены работы Бельской и др. (Belskaya et al., 2003b, 2005). Показано, что у некоторых низкоальбедных астероидов нелинейное возрастание блеска вблизи оппозиции практически отсутствует, и это сопровождается аномально неглубокой ветвью отрицательной поляризации с малым углом инверсии. Возможность существования такого эффекта также предсказывалась в рамках механизма обратного когерентного рассеяния света.

В последние годы поляриметрические наблюдения астероидов активно проводятся с использованием крупных телескопов в рамках кооперативных программ с учеными Италии, Франции и Аргентины. Это позволило значительно увеличить количество астероидов, для которых имеются измерения степени линейной поляризации света, и существенно расширить данные о поляриметрических свойствах поверхностей астероидов редких композиционных типов. В частности, обнаружены астероиды с экстремальными поляриметрическими свойствами поверхности. Так, у астероида F-типа 419 Аурелия с альбедо поверхности 0,05 ветвь отрицательной поляризации оказалась нехарактерной для низкоальбедных поверхностей с  $P_{\min} \sim 1\%$  и рекордно малым углом инверсии  $\alpha_{\text{inv}} \sim 14^\circ$  (Belskaya et al., 2005). В то же время у астероида S-типа 234 Барбара с альбедо поверхности 0,23 обнаружена глубокая ветвь поляризации с  $P_{\min} \geq 1,3\%$  и рекордно большим углом инверсии  $\alpha_{\text{inv}} > 26^\circ$  (Cellino et al., 2006). Интерпретация таких свойств в настоящее время затруднительна, но в любом случае, вызвано ли такое поведение поляризации особым составом и/или структурой поверхности, оно является нетипичным для астероидов, так как только один из всех наблюдавшихся астероидов имеет столь большой угол инверсии.

В связи с накоплением большого числа данных поляриметрических наблюдений астероидов и продолжающимся их пополнением, а также в связи с тем, что форма представления этих данных у каждого автора своя, совместное использование их оказалось весьма трудным. В то же время суммарный объем данных наблюдений (свыше 100 астероидов) был достаточным для проведения различного рода статистических анализов, особенно с использованием данных других методов исследований. Для этого необходимо было унифицировать форму представления результатов наблюдений и иметь все данные (в том числе и новые) в едином формате. Именно с этой целью и создан Поляриметрический банк астероидных данных (ПБАД) (Васильев, 1996, Лупишко и Васильев, 1997). Последняя версия ПБАД содержит в едином формате опубликованные и неопубликованные результаты поляриметрических наблюдений свыше 130 астероидов. ПБАД снабжен сервисными программами и включает в себя также файл литературных источников по поляриметрии астероидов (свыше 200 ссылок). Он вошел составной частью в Международную базу данных НАСА («Planetary Data System»), является доступным через сеть Internet (<http://PDS.jpl.nasa.gov/>) и ежегодно пополняется новыми наблюдательными данными.

Исследования астероидов, безусловно, не ограничивались только проведением наблюдений, обработкой и интерпретацией полученных данных о конкретных астероидах. Много внимания уделялось также постановке новых наблюдательных программ, а также анализу и интерпретации всех имеющихся данных по тем или иным проблемам физики астероидов. Одно из таких исследований было посвящено составу вещества астероидов M-типа («металлических»). Дело в том, что до конца 1970-х годов детальных исследований астероидов этого типа не проводилось. Наиболее серьезной попыткой интерпретации имеющихся малочисленных поляриметрических наблюдений M-астероидов были лабораторные поляриметрические измерения металлических порошков, проведенные Дольфюсом и др. во Франции [4]. На основе этих измерений был сделан вывод о том, что поверхности M-астероидов не могут быть силикатными, а представляют собой слой металлических фрагментов размерами 20–50 мкм. Этот вывод нам показался слишком смелым и, возможно, недостаточно обоснованным. Поскольку природа M-астероидов представляет значительный научный и прикладной интерес (возможные ядра дифференцированных

космических тел, позволяющие изучать их недра, источники металлов и т.п.), была предпринята широкая программа фотометрических и поляриметрических наблюдений крупнейших астероидов М-типа и соответствующих лабораторных фотометрических и поляриметрических измерений ряда метеоритных и земных образцов различного состава, но примерно одинаковой структуры (22 образца, представляющих основные типы метеоритов, земные пороодообразующие силикаты и техногенные металлы Fe, Ni, Al, Pb). Анализировались полученные данные по фазовым зависимостям блеска и поляризации астероидов и образцов, причем основная идея состояла в том, что сравнивались данные по астероидам (М и S-типов) между собой и по образцам (металлическим и силикатным) между собой. В результате проведенного исследования с использованием имеющихся спектральных данных было показано, что поверхности крупнейших М-астероидов не являются чисто металлическими (как утверждали Дольфус и др. [4]), а содержат значительную силикатную компоненту (Lupishko and Belskaya, 1989). Этот вывод подтверждается данными о средних скоростях вращения астероидов основных типов в рамках теории Харриса [5] и более поздними спектральными данными американских и российских коллег, нашедших в спектрах М-астероидов интенсивные полосы поглощения силикатов [6-8]. Наиболее подходящими метеоритными аналогами вещества М-астероидов, как было показано, могут быть железо-каменные метеориты – мезосидериты и энстатитовые хондриты типа E4. Эти исследования легли в основу кандидатской диссертации И. Н. Бельской (1987).

Еще одна работа, связанная с минералогией астероидов, была выполнена Ф. П. Величко вместе с коллегами из Астрофизического института АН Казахской ССР (Алма-Ата). В 1986 и 1988 г.г. на 70-см рефлекторе АЗТ-8 этого института, оснащенном двухканальным спектрометром, были проведены спектрофотометрические наблюдения астероида 4 Веста в полосе поглощения пироксена  $\lambda$  920 нм. Анализ результатов измерений выявил вариации интенсивности поглощения в этой полосе с вращением астероида вокруг своей оси амплитудой 6-8%, что, по мнению авторов этой работы (Вдовиченко и др., 1990), связано главным образом с изменениями глубины исследуемой полосы. Это указывает на значительную неравномерность в распределении пироксена по поверхности Весты либо степени зрелости (возраста) или же раздробленности пироксеносодержащего вещества некоторой области на астероиде, подверженной ударному воздействию. Анализ индивидуальных спектров, полученных при разных фазах вращения Весты, выявил тенденцию к смещению центра полосы в длинноволновую область спектра при возрастании ее глубины. На этом основании авторы сделали вывод о том, что предполагаемое «пироксеновое пятно» может иметь более высокое содержание кальция. Оценка его положения на поверхности астероида показывает, что оно расположено в южной полусфере не ближе, чем в  $30^\circ$  от экватора, и имеет диаметр  $20 - 40^\circ$  в планетографической системе координат. Не без оснований авторы этого исследования отмечают, кроме того, что «образование крупного кратера на Весте могло оказаться причиной более быстрого (по сравнению с другими астероидами сопоставимого размера) ее вращения». С удовольствием заметим, что 6 лет спустя после опубликования этих результатов, с помощью космического телескопа Хаббла на Весте обнаружен гигантский кратер размером 460 км (при диаметре астероида 525 км), который вместе с валом занимает большую часть южного полушария [9]. В этой статье, в частности, отмечается, что глубина и ширина полосы поглощения вблизи 1 мкм возрастают с глубиной рельефа в области кратера, что соответствует более высокому содержанию кальция в открывшихся нижележащих слоях. Таким образом, выводы о причинах вариаций полосы  $\lambda$  920 нм и более высокое содержание кальция в «пироксеновом пятне» (Вдовиченко и др., 1990) подтверждены данными телескопа Хаббла.

Закон рассеяния света (ЗРС) поверхностью астероида является ее важнейшей оптической характеристикой, знание которой необходимо для самых различных целей. Однако, в отличие от Луны и больших планет, изучение ЗРС поверхностями астероидов является задачей довольно сложной, поскольку мы измеряем лишь интегральный блеск объекта и, как правило, в малом диапазоне фазовых углов. Наша идея состояла в том, чтобы для оценки вида функции распределения яркости по диску астероида использовать интегральную характеристику блеска, а именно: зависимость амплитуды кривой блеска от фазового угла  $A(\alpha)$ , поскольку амплитуда кривой блеска содержит в себе информацию не только о форме, альбедной неоднородности, геометрии наблюдения астероида, но и о

законе рассеяния света его поверхностью. В наблюдаемом с Земли диапазоне фазовых углов амплитуды кривых блеска астероидов возрастают линейно с углом фазы, при этом наклон зависимости прямо пропорционален величине амплитуды при нулевом фазовом угле  $A(0^\circ)$ . Задача, таким образом, сводится к численному моделированию зависимости  $A(\alpha)$  для всех известных ЗРС, сравнению с результатами наблюдений и определению наиболее пригодного закона для описания распределения яркости по диску астероида. В результате проведенного исследования (Акимов и др., 1992) авторами впервые было показано, что из всех используемых в физике планет законов рассеяния света только законы Хапке и Акимова достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемую для астероидов зависимость  $A(\alpha)$ , то есть адекватно описывают распределение яркости по диску. Для практических целей рекомендовано использовать законы Акимова (Акимов, 1988), и в первую очередь теоретический, который намного проще и удобнее, чем улучшенный закон Хапке. Последний, в силу большого числа свободных параметров, приводит к неоднозначному решению.

Вопрос о том, насколько поверхности астероидов фотометрически неоднородны, является весьма важным для понимания процессов их формирования и переработки. Ранее, на основании измерения вариаций цвета и поляризации с вращением астероида вокруг своей оси был сделан вывод, что поверхности большинства астероидов являются в значительной степени фотометрически однородными, следовательно, кривые блеска обусловлены формой астероидов, а вклад вариаций альбедо незначителен [10]. Однако отождествление ЗРС, наиболее адекватно описывающего рассеивающие свойства астероидных поверхностей, позволило нам найти новый подход к решению этого вопроса (Акимов и др., 1983). Было показано, что наиболее чувствительной величиной для обнаружения фотометрических неоднородностей астероидных поверхностей является их отражательная способность, если мы можем учесть (исключить) влияние формы астероида на его кривую блеска. Если поверхность фотометрически однородна и отражает по закону Акимова (то есть имеет распределение яркости по диску астероида такое же, как у лунного реголита), то в противостояние ( $\alpha = 0^\circ$ ) при любой форме астероида разность блеска его противоположных сторон должна быть равна нулю, поскольку в этом случае количество отраженного света равно произведению площади видимого поперечного сечения фигуры на среднее альбедо видимой поверхности. Отклонение от этой закономерности можно рассматривать как признак фотометрической неоднородности. На основе этой идеи предложен метод оценки величины фотометрической неоднородности поверхностей астероидов и разграничения вклада альбедных вариаций и формы астероида в кривую блеска. Было показано, в частности (Акимов и др., 1983), что вариации отражательной способности, усредненные по видимой стороне (полусфере) некоторых астероидов, достигают значений 0,20 зв. вел., то есть больше, чем для поверхностей Марса и галилеевых спутников Юпитера. Таким образом, поверхности астероидов оказались фотометрически значительно более неоднородными, чем считалось ранее.

Небольшой цикл работ, выполненных в нашей группе, посвящен определениям альбедо астероидов (Lupishko and Mohamed, 1996, Лупишко, 1998б, Лупишко, 1998в, Shevchenko and Tedesco, 2006). Дело в том, что с опубликованием второй версии IRAS-альбедо и диаметров астероидов [11] фактически была предложена новая шкала геометрических альбедо астероидов. Эта шкала в качестве абсолютной звездной величины использовала не  $V(1,0)$ , то есть экстраполяцию линейной части фазовой кривой блеска на  $\alpha=0^\circ$ , а параметр  $H$ , который отличается от  $V(1,0)$  на величину опозиционного эффекта астероида в точке  $\alpha=0^\circ$ . При этом бралась средняя величина опозиционного эффекта, а она, как мы теперь знаем (Belskaya and Shevchenko, 2000), зависит от альбедо астероида. В результате, новые IRAS-альбедо стали «конфликтовать» с поляриметрическими, радиометрическими и др. Это как раз и стимулировало проведение исследований, касающихся альбедо астероидов.

Поляриметрический метод определения альбедо астероида основан, как известно, на использовании эмпирических зависимостей «наклон  $h$  – альбедо» и « $P_{\min}$  – альбедо», константы которых были получены более 30 лет назад по лабораторным измерениям метеоритных образцов. С тех пор получены другие ряды определений альбедо астероидов, в частности, а) наземные радиометрические альбедо; б) радиометрические IRAS-альбедо; в) альбедо из наблюдений покрытий звезд астероидами. Кроме того, начиная с 1984 г. нами

были проведены новые поляриметрические наблюдения и определены параметры поляризационных фазовых кривых  $P_{\min}$  и  $h$  еще для 34 астероидов. Используя все эти данные, Лупишко Д. Ф. и его аспирант из Ливии Рафа Мохамед предложили новую калибровку шкалы поляриметрических альбедо, то есть новое определение констант отмеченных выше зависимостей (Mohamed, 1995, Lupishko and Mohamed, 1996). Сравнение новых поляриметрических альбедо астероидов со старыми показало, что они, в принципе, различаются не сильно. Это означает, что эмпирические соотношения «наклон  $h$  – альбедо» и « $P_{\min}$  – альбедо» оказались достаточно универсальными, одинаково хорошо удовлетворяющими как лабораторным образцам, так и поверхностям реальных астероидов. Однако новые константы этих соотношений заметно улучшили внутреннюю сходимость определения альбедо независимо по двум параметрам  $P_{\min}$  и  $h$  (Лупишко, 1998а).

IRAS-альбедо и диаметры астероидов [11], как известно, определены для более чем 2000 астероидов и поэтому представляют самый большой массив относительно однородных данных, по численности превышающий остальные ряды определений этих параметров на 1-2 порядка. Как самые многочисленные, IRAS-данные используются для решения задач классификации астероидов, выделения и изучения физических семейств астероидов, интерпретации радарных наблюдений, оценки плотностей и пористости астероидов и др. Однако, наряду с этим, IRAS-альбедо (и, соответственно, IRAS-диаметры), как оказалось, отягощены значительными случайными и систематическими ошибками.

В результате сравнения IRAS-альбедо с остальными рядами определений геометрического альбедо астероидов (наземными радиометрическими, поляриметрическими и альбедо, полученными из покрытий звезд астероидами) было показано (Лупишко, 1998б), что: а) систематические погрешности IRAS-альбедо возрастают прямо пропорционально величине самого альбедо и б) поляриметрические альбедо являются промежуточными между IRAS и наземными радиометрическими альбедо и ближе всего соответствуют наиболее точным значениям альбедо, полученным из покрытий. Именно по этой причине поляриметрические альбедо 127 астероидов, полученные по новой калибровке (Lupishko and Mohamed, 1996), были использованы для определения систематической ошибки IRAS-альбедо и ее исключения. Предложенная методика определения и учета систематической ошибки IRAS-альбедо (Лупишко, 1998б) позволяет получать более точные значения IRAS-альбедо и диаметров астероидов по сравнению с исходными каталожными данными.

Новый шаг в улучшении альбедо астероидов предпринял В. Г. Шевченко совместно с американским коллегой Э. Тедеско. Поскольку диаметры астероидов, определяемые из покрытий звезд астероидами, являются наиболее точными по сравнению с получаемыми другими наземными методами, то, используя абсолютную звездную величину, можно определить и их альбедо из покрытий, которые тоже должны быть наиболее точными. Из-за отсутствия определений абсолютных звездных величин астероидов для тех геометрических условий, при которых наблюдались покрытия, сложилась такая ситуация, что альбедо из покрытий определены на данный момент всего для примерно десяти астероидов, в то время как диаметры из покрытий имеются для более чем ста астероидов. Таким образом, основная задача состояла в том, чтобы максимально точно определить абсолютную звездную величину астероида  $H$  для того аспекта, при котором получен его диаметр из наблюдений покрытия. Для ряда астероидов она была определена по их фазовым зависимостям при тех же аспектах, что и наблюдения покрытий, а для остальных – бралась из Asteroid Photometric Catalogue [12] и редуцировалась на момент покрытия, с использованием фотометрической модели астероида, разработанной Шевченко (1997а). Модель учитывала изменение площади проекции астероида из-за изменения аспекта. В некоторых случаях величина  $H$  вычислялась по фазовой функции (Шевченко, 1997б); средние значения оппозиционного эффекта брались из работы (Belskaya and Shevchenko, 2000). В результате получено альбедо из покрытий 57 астероидов разных типов, для 18-ти из которых с ошибкой не более 5 %. Они могут быть использованы для калибровки шкалы альбедо астероидов, полученных другими методами.

Из-за ограниченности объема данного обзора в него не включены такие важные результаты, как оценка величины смещения фотоцентра астероида при астрометрических наблюдениях (Тунгалаг и др., 2000), обнаруженная бимодальность в распределении альбедо S-астероидов (Лупишко, 1998в), результаты UBVRI-поляриметрии астероидов 1

Церера (Лупишко, 1998а) и 16 Психея (Бельская и др., 1985); зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров (Тунгалаг и др., 2003), инверсия спектрального хода поляризации S-астероидов (Лупишко, 1998а) и многие другие, которые заинтересованный читатель сможет найти в соответствующих ссылках.

## Кометы

С приходом в наш отдел в 1995 г. Н. Н. Киселева тематика отдела была дополнена поляриметрическими и фотометрическими исследованиями комет, причем акцент был сделан на сравнительном изучении характеристик астероидов и комет. Несмотря на различие физических свойств, наблюдаемые характеристики рассеянного излучения астероидов и комет похожи. Например, фазовые зависимости их поляризации (ФЗП) показывают отрицательную ветвь с близкими параметрами  $P_{\min} \approx -1,5\%$ ,  $\alpha_{\min} \approx 10^\circ$ ,  $\alpha_{\text{inv}} \approx 22^\circ$ , поляриметрический наклон  $h \approx 0,3\%$  на градус и положение максимума поляризации  $\alpha_{\max} \approx 100^\circ$ . Близость параметров ФЗП комет и низкоальбедных астероидов С, Р и D-типов отмечалась в ряде исследований. Для астероидов и комет наблюдаются похожие фотометрические оппозиционные эффекты. Удивительное подобие оппозиционных эффектов указывает на то, что существует единый физический механизм рассеяния света, отвечающий за эти эффекты (Шкуратов, 1997), и он носит, по-видимому, фундаментальный характер. Вместе с тем, для астероидов и комет наблюдаются явные различия в спектральных зависимостях поляризации. Поэтому выявление сходства и различия рассеивающих свойств пылевых частиц комет и реголита астероидов может стимулировать развитие теоретических механизмов рассеяния света и разработку моделей рассеяния света пылевыми частицами безатмосферных космических тел и полидисперсных сред, таких как кометные атмосферы, кольца планет и межпланетное пылевое облако. Кроме отмеченных выше причин, необходимость сравнительного исследования астероидов и комет определяется их генетической и эволюционной связью и той ролью, которую оба класса малых тел могут сыграть в проблеме астероидно-кометной опасности.

Фотометрические и поляриметрические наблюдения комет в нашем отделе были начаты в 1996 г. Н. Н. Киселевым и Ф. П. Величко. В 2000 г. к ним присоединился сын последнего, Сергей Величко, – студент астрономического отделения физического факультета нашего университета с 2001 г. и аспирант НИИ астрономии – с 2006 г. В период 1996–2006 г.г. были проведены поляриметрические и фотометрические наблюдения комет C/1995 O1(Хейла-Боппа), C/1996 B2(Хиакутаке), 21P/Джакобини-Циннера, D/1999 S4 (LINEAR), C/2001 A2 (LINEAR), 153P/Икея-Жанг, C/2003 K4 (LINEAR) и C/2004 Q2 (Мачхольца). Все наблюдения выполнены с одноканальным фотометром-поляриметром на 0,7-м телескопе АЗТ-8 Чугуевской наблюдательной станции. В большинстве случаев наблюдения проводились с использованием специальных узкополосных кометных фильтров, выделяющих области кометного континуума и молекулярных эмиссий. Для вычисления производительности молекулярных эмиссий и пыли использовалась модель Хазера и методика, рекомендованная М. А'Херном в рамках проведения Международной службы кометы Галлея (IHW) (см., например, Kiselev and Velichko, 1997, 1998). Ряд поляриметрических исследований комет был проведен по кооперативным программам с ГАО НАН Украины (В. Розенбуш), Институтом исследования тел Солнечной системы в Катленбург-Линдау, ФРГ (К. Йокерс) и Крымской астрофизической обсерваторией (Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов). Использовались 2-м телескоп обсерватории Пик Терскол, 1,25-м и 2,6-м телескопы КрАО. Перечень исследованных комет приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сводка поляриметрических и фотометрических наблюдений комет

Исследование каждой кометы является существенным дополнением наших знаний как об индивидуальных свойствах, так и об общих закономерностях поляризованного излучения комет. С этих позиций мы проводили наблюдения каждой доступной для нашего телескопа кометы. Однако основное направление исследований заключалось в решении проблемы классификации комет, основанной на поляриметрических и фотометрических свойствах их рассеянного излучения, и выявлении связи физических характеристик комет с их местами происхождения. Наблюдаемое различие в максимальной степени поляризации двух групп комет было отмечено еще в кандидатской диссертации Н. Н. Киселева в 1982 г. Однако интерпретировалось это различие по-разному. В работах [13,14] деление комет на два или даже три класса на основе различий поляризации их излучения на больших фазовых углах объяснялось разными физическими свойствами пыли, в частности, размерами пылевых частиц. Систематическое исследование в этом направлении было проведено в докторской диссертации Киселева (2003), в которой реальность таксономии комет на поляриметрические классы была поставлена под сомнение. Исследование газовых комет D/1996 Q1 (Табура) (Киселев и др., 2001b) и C/2001 A2 (LINEAR) (Rosenbush et al., 2002) выявило значительную зависимость степени поляризации комет от размера измеряемой области комы. Для решения этой проблемы в ноябре 2003 г. была проведена кооперативная программа поляриметрических наблюдений газовой кометы 2P/Энке (Jockers et al., 2005). Было показано, что пыль в газовых кометах сосредоточена в небольшой, размером  $\leq 600$  км, околоядерной области, и что степень поляризации в этой области такая же высокая, как и у пылевых комет. Тем самым впервые убедительно было доказано, что деление комет на две группы: пылевые, с высокой степенью поляризации, и газовые, с низкой степенью поляризации на больших фазовых углах, является артефактом, вызванным низким пространственным и спектральным разрешением аппаратуры, используемой для поляриметрических наблюдений.

В работах (Киселев, 2003, Kiselev et al., 2005) обобщены исследования многих комет и получены их составные фазовые зависимости линейной поляризации, см. рис. 2.2.9. Было показано, что для пылевых комет имеется хорошее согласие между данными, полученными для узкополосных и широкополосных фильтров (рис. 2.2.9, слева). Это очевидно, так как при высоком уровне непрерывного спектра вклад эмиссий в континуумные фильтры будет незначительным. Противоположная картина наблюдается для газовых комет, поляризация

которых сильно зависит от измеряемой области комы и полосы пропускания используемого фильтра, что приводит к значительному разбросу данных на составной фазовой зависимости поляризации комет, как показано на рис. 2.2.9, справа. Результаты наших поляриметрических исследований газовых и пылевых комет и их сопоставление с опубликованными данными по тепловым свойствам пылинок, полученным на основе ИК-наблюдений, позволяют заключить, что не только размер пылинок, но и их пористость определяют основные наблюдаемые свойства.

Одной из трудностей поляриметрических исследований комет было отсутствие полных фазовых зависимостей поляризации, которые включали бы в себя максимальную степень поляризации. Предполагалось, что максимум степени поляризации комет лежит на  $90^\circ$ , что соответствует рассеянию света на релеевских частицах. Мы провели наблюдения комет C/1995 B2 (Хиакутаке) (Kiselev and Velichko, 1998), D/1999 S4 (ЛИНЕАР) (Киселев и др., 2001a) и 153P/Икея-Жанг (Velichko and Velichko, 2002), предоставлявших возможность наблюдений на больших фазовых углах, и впервые нашли, что среднее значение максимальной степени поляризации комет лежит на фазовом угле  $95 \pm 1^\circ$  и слабо зависит от длины волны.

Спектральная зависимость поляризации континуума комет является одной из важнейших характеристик, необходимых для определения физических свойств пыли. До исследования кометы Галлея в литературе обсуждались две возможности: степень поляризации возрастает с увеличением длины волны или поляризация не зависит от длины волны. Анализ наблюдений ряда комет (Kiselev et al., 2005) в широком спектральном диапазоне свидетельствует о том, что степень поляризации большинства комет немонотонно растет с увеличением длины волны в области 0,36–2,2 мкм. Кроме того, спектральный ход поляризации зависит от фазового угла, становясь почти плоским на фазовых углах менее  $30^\circ$ . Однако наше исследование кометы 21P/ Джакобини-Циннера (Kiselev et al., 2000a, Kiselev et al., 2000b), проведенное по кооперативной программе, впервые выявило аномальную зависимость степени поляризации от длины волны, а именно, поляризация уменьшается с  $\lambda$ . Вследствие этой особенности фазовая зависимость поляризации кометы Джакобини-Циннера систематически на  $\sim 2\%$  ниже (рис. 2.2.9), по сравнению с зависимостью для других пылевых комет.

Причиной необычного спектрального тренда поляризации кометы может быть большое содержание органического вещества в комете (Kiselev et al., 2000a, Kiselev et al., 2000b). Косвенно о необычных свойствах пыли в комете Джакобини-Циннера свидетельствуют ее аномальный химический состав и исследования метеорного потока Драконида, прародительницей которого она является. Согласно работе [15], в метеороидах потока Драконид доля органического вещества составляет около 90%. Подобный ход спектральной зависимости поляризации большую часть времени наблюдался и у кометы D/1999 S4 (LINEAR) (Velichko, 2002, Киселев, 2003). Интересно отметить, что обе кометы принадлежат к группе комет с дефицитом углеродосодержащих молекул.

Кометы – нестационарные и быстро эволюционирующие при сближении с Солнцем малые тела. Развитие газопылевых атмосфер и хвостов комет и вызывающие их физические процессы для каждой кометы уникальны, а для большинства долгопериодических комет неповторимы. Таким уникальным объектом была комета C/1995 O1 (Хейла-Боппа). Наши фотометрические исследования (Kiselev and Velichko, 1997) показали, что производительность молекул газа была на порядок, а производительность пыли на два порядка больше, чем соответствующие величины у кометы Галлея. Комета Хейла-Боппа была самой запыленной из всех известных комет. Мы обнаружили также, что степень ее поляризации на сопоставимых фазовых углах была на  $\approx 4\%$  выше любой другой кометы. Это хорошо видно на рис. 2.2.9. Высокая степень поляризации излучения кометы Хейла-Боппа вызвана особыми оптическими свойствами ее пылевых частиц. Рассеяние света на мелких и/или темных пылевых частицах может приводить к высокой степени поляризации [16]. В соответствии с этим можно заключить, что атмосфера кометы Хейла-Боппа имела необычно высокое содержание мелких поглощающих пылинок по сравнению с другими кометами. Этот вывод подтвержден количественными оценками, сделанными на основе результатов ИК-наблюдений, согласно которым в атмосфере кометы преобладали пылевые частицы с радиусом  $< 0,4$  мкм [17].

Другим уникальным объектом была комета D/1999 S4 (LINEAR). Возможность



наблюдений достаточно яркой кометы на большом диапазоне фазовых углов  $55 - 121^\circ$  определила первоначальную задачу наблюдений – нахождение максимума поляризации излучения кометного континуума. Однако во время наблюдений 28 и 29 июля 2000 г. было обнаружено разительное изменение вида кометы. Кома практически полностью исчезла, и у кометы был виден только один хвост с равномерной и низкой поверхностной яркостью. Измерения дали резкое увеличение степени поляризации кометы (почти на 4%), согласующееся с изменением вида кометы (Киселев и др., 2001а). Причина значительного увеличения степени поляризации кометы связана с тем, что дезинтеграция ядра кометы привела к увеличению числа мелких пылевых частиц в ее атмосфере.

Исследование внутренней структуры и свойств кометных ядер (в том числе и пылевой составляющей) возможны в редких случаях наблюдений комет в процессе их частичной фрагментации или полной дезинтеграции. Вызвать искусственный выброс внутренней материи ядра комет был призван эксперимент «DEEP IMPACT». При сближении 4 июля 2005 г. КА с кометой 9P/Темпель 1 проведено столкновение специального устройства (импактора) с ядром кометы, в результате чего произошел выброс «свежей» материи из ядра кометы. Важная роль в осуществлении этого эксперимента отводилась наземным наблюдениям. К сожалению, нам удалось провести наблюдения кометы только до столкновения. Однако результаты наших наблюдений дополняют сведения о комете и могут быть сопоставлены с результатами других авторов, полученных как до, так и после столкновения импактора с ядром кометы. Результаты показывают, что степень поляризации излучения кометы Темпель 1 в фильтре R была на  $\approx 1,8\%$  ниже типичной степени поляризации других пылевых комет на сопоставимых фазовых углах.

Построение реалистичной модели рассеяния света на пылевых частицах невозможно без учета формы пылинок. Информацию о форме пылинок, механизмах ориентации несферических частиц и о составе можно получить, исследуя круговую поляризацию. С этой целью в отделе был создан фотометр-поляриметр «STOKES-4», с помощью которого можно проводить одновременные измерения круговой и линейной степени поляризации небесных тел. С помощью этого прибора проведены пробные наблюдения круговой поляризации нескольких астероидов и комет. Для кометы C/2003 K4 (LINEAR) 15 – 16 августа 2004 была обнаружена интегральная круговая поляризация на уровне  $\approx 0,5\%$ .

Для анализа свойств поляризованного излучения комет, теоретического моделирования фазовых и спектральных зависимостей поляризации, классификации комет на основе данных поляриметрии, фотометрии, спектроскопии и динамических характеристик комет, а также и для других целей удобно иметь все результаты поляриметрии комет в одном файле-каталоге. Собранные и упорядоченные данные могут служить экспериментальной основой для многих целей, в частности, при планировании космических миссий к кометам. В связи с этим была выполнена работа по составлению электронной базы данных поляриметрии комет. База данных содержит сведения о линейной и круговой поляризации излучения 64 комет – всего 2653 наблюдений, проведенных в период с 1940 по 2005 г.г. Представленные данные охватывают спектральный диапазон  $0,3 - 2,2$  мкм, диапазон фазовых углов  $0,4 - 122^\circ$ , гелиоцентрических и геоцентрических расстояний комет  $0,6 - 4,8$  а.е. и  $0,03 - 4,9$  а.е., соответственно. Часть данных из этой базы была использована для анализа поляриметрических свойств комет (Kiselev et al., 2005). Созданная база данных по поляриметрии комет с 2006 г. является составной частью международной базы данных (EAR-C-COMPIL-5-DB-COMET-POLARIMETRYV1.0, NASA Planetary Data System) и доступна для пользователей.

### **Объекты пояса Койпера**

Обнаружение внешнего пояса малых тел, находящегося за орбитой Нептуна, существенно изменило представление о Солнечной системе. Главный пояс астероидов, расположенный между орбитами Марса и Юпитера, перестал быть «уникальным» образованием, а планета Плутон оказалась одним из объектов Койперовского пояса. За 15 лет, прошедших с обнаружения первого транснептуного объекта в 1992 г., открыто более 1100 таких тел, распределение орбит которых показало сложную динамическую структуру внешнего пояса. Принято выделять три класса транснептуновых объектов (ТНО): классические, имеющие близкие к круговым орбиты с большими полуосями  $42 - 48$  а.е.; резонансные, находящиеся в резонансах с орбитальным движением Нептуна, и объекты рассеянного диска,

отличающиеся вытянутыми орбитами с высокими наклонениями, простирающимися на много далее 50 а.е. Считается, что популяция Кентавров, к которой относят тела, имеющие перигелий и большую полуось между орбитами Юпитера и Нептуна, также динамически связана с ТНО и представляет собой переходную популяцию от объектов рассеянного диска к кометам семейства Юпитера. Понимание процессов происхождения и эволюции внешнего пояса малых тел, их взаимосвязей с кометами и астероидами внутреннего пояса – один из ключевых космогонических вопросов.

Сразу же после открытия первых тел за орбитой Нептуна, началось интенсивное изучение их физических свойств всеми доступными методами как с помощью наземных, так и космических телескопов. Основная сложность наблюдений связана со слабым видимым блеском большинства этих объектов. Для их наблюдений необходимы очень крупные телескопы с диаметром зеркала 8 – 10 м. По инициативе группы европейских астрономов, под руководством Г. Бонарта (Германия) и А. Баруччи (Франция), в 2001 г. была начата кооперативная программа спектрофотометрических и поляриметрических наблюдений ТНО на 8-м телескопах Южной Европейской обсерватории (Чили). И. Н. Бельская вошла в состав участников этого масштабного проекта.

Одним из важных результатов проведенных наблюдений стали измерения широкополосных показателей цвета поверхностей более 70 транснептуновых объектов в видимой и ближней ИК областях спектра. Цвет поверхности дает первое представление о ее возможном составе, а знание показателей цвета большого числа объектов позволяет ответить на вопрос, существуют ли среди ТНО группы объектов с подобными свойствами. Именно измерения показателей цвета легли в основу классификации астероидов главного пояса по типам поверхности, ставшей эффективным инструментом в изучении их физических свойств. А. Баруччи и И. Н. Бельская предложили первую таксономию тел Койперовского пояса и Кентавров, основанную на данных измерений показателей цвета B-V, V-R, V-I, V-J для 51 объекта (Barucci et al., 2005). Были выделены четыре однородные группы тел, для обозначения которых в отличие от таксономии астероидов предложены двухбуквенные названия BB, BR, IR, RR. Тела с нейтральными цветами по отношению к Солнцу отнесены к BB-типу, а с очень красными цветами – к RR-типу, BR тип включает объекты с промежуточными цветами, а IR-тип – умеренно красные тела (рис. 2.2.10). BB и BR типы имеют спектры, подобные астероидам C и D-типов, тогда как для остальных типов аналогов среди астероидов главного пояса не найдено. Интересно отметить, что среди Кентавров выделяются только два класса объектов, что подтверждает вывод Peirinho et al. (2003) о бимодальности их распределения по цветам, и, возможно, свидетельствует о двух различных источниках их происхождения. Найдены и другие корреляции между типами поверхности и орбитальными параметрами. В частности, большая часть классических тел принадлежит к RR-типу, а тела с высокими наклонениями орбит – к BB-типу. Один из важных вопросов, на который еще предстоит получить ответ, – является ли разнообразие цветов поверхностей ТНО результатом различий в их составе или связано с различной степенью переработки поверхностей в процессе эволюции.

Наземные наблюдения объектов Койперовского пояса могут быть проведены только на малых фазовых углах, так как для тех расстояний от Солнца, где они находятся (~40 а.е.), фазовый угол не превышает 2°. На столь малых фазовых углах существенную роль должен играть оппозиционный эффект. Опыт исследования оппозиционного эффекта астероидов, накопленный в нашей группе, оказался очень востребованным при изучении Койперовских тел. Статья (Belskaya et al., 2003a), доказывающая существование узкого оппозиционного пика в фазовых зависимостях блеска этих тел и обратившая внимание на важность его учета при анализе данных, вызвала большой интерес. Оппозиционный эффект может являться причиной изменения амплитуды кривых блеска, что наблюдалось у некоторых тел. При этом исчезает необходимость привлекать сенсационные выводы о необычной кометной активности этих тел (например, [18]). Измерения фазовой зависимости блеска крупного транснептунового тела 20000 Варуна, инициированные И. Н. Бельской, показали, что на фазовых углах, меньших 0,1°, наблюдается ярко выраженный оппозиционный пик, а его амплитуда составляет 0,2 зв. вел. по отношению к линейной части фазовой зависимости (рис. 2.2.11). Альbedo Варуны по результатам наземных радиометрических наблюдений оценивалось как 0,05 – 0,07 [19]. Но измеренная амплитуда оппозиционного эффекта оказалась нетипичной для темных поверхностей, поэтому было высказано предположение о более

высоком альбедо этого объекта (Belskaya et al., 2006). Данные новых радиометрических наблюдений Варуны с помощью космического телескопа Spitzer подтвердили это предположение, указав наиболее вероятный диапазон значений альбедо от 0,08 до 0,23. Большие погрешности в определении альбедо ТНО традиционным радиометрическим методом связаны прежде всего с низкой температурой их поверхности  $\sim 30 \div 50^\circ\text{K}$  и, соответственно, низкой тепловой эмиссией. Поэтому, возможность оценки альбедо ТНО фотометрическим методом по амплитуде оппозиционного эффекта вызывает большой интерес.

Первые поляриметрические наблюдения ТНО показали перспективность использования этого метода в изучении физических свойств их поверхностей. Несмотря на близость к нулю и небольшой диапазон значений фазовых углов, доступных наземным наблюдениям, измеренные значения степени линейной поляризации оказались велики. Наиболее интересный результат получен по наблюдениям Кентавра 2060 Хирон, проведенным в трех стандартных BVR-полосах в диапазоне фазовых углов  $1,4 - 4,2^\circ$  (Bagnulo et al., 2006). Эти наблюдения выявили ярко выраженную отрицательную ветвь поляризации с минимумом, достигающим  $1,4 - 1,5\%$  на фазовых углах  $1,5 - 2,0^\circ$ . Ни одно из других малых тел Солнечной системы не показывает такую высокую степень отрицательной поляризации на таких фазовых углах. Возможно, что фазовая зависимость поляризации Хирона является очень асимметричной с минимумом, смещенным к малым фазовым углам. В настоящее время поляриметрические наблюдения проведены только для 4-х ТНО разных динамических классов. Несмотря на малочисленность наблюдательных данных, они свидетельствуют о разнообразии свойств поверхностей этих объектов, существенно отличающихся от поверхностей астероидов главного пояса.

Изучение физических свойств транснептуновых объектов находится в начальной стадии, хотя нужно отметить, что популяция ТНО изучена значительно лучше по сравнению с нашими знаниями об астероидах главного пояса в то время, когда их было открыто примерно столько же. В настоящее время это наиболее быстро развивающаяся область исследований в современной науке о Солнечной системе, и наша Харьковская группа активно в них участвует.

## **Заключение**

Таким образом, 30 лет назад на АО ХГУ впервые в Советском Союзе были начаты систематические исследования малых планет-астероидов, которые успешно продолжаются и сейчас. К настоящему времени тематика исследований существенно расширилась, и Харьковская группа стала одной из наиболее активных групп в Европе в исследовании малых тел. В этот ограниченный по объему обзор вошла лишь небольшая часть наших результатов, которые, как надеются авторы, будут давать последующим поколениям астрономов-исследователей нашего Института представление о том, какими интересами мы жили и чем занимались на рубеже двух тысячелетий. Хочется, чтобы у читателя создалось верное представление о том, что мы в своих исследованиях не были изолированной группой, а находились, так сказать, «в центре событий» мировой науки о малых телах, а иногда и на переднем ее крае (в таких направлениях, как поляриметрия астероидов и комет; изучение оппозиционного эффекта астероидов, комет и тел пояса Койпера; рассеяние света поверхностями астероидов и атмосферами комет, таксономия комет и др.). Наши исследования ведутся в тесном сотрудничестве с учеными США, Германии, Франции, Италии, Швеции, Чехии, Польши и других стран. Это и совместные наблюдательные программы, и многочисленные совместные статьи в престижных международных изданиях, и доклады на международных конференциях. Ежегодно сотрудники нашего отдела принимают участие в 2-4 конференциях за рубежом, практически во всех конференциях и симпозиумах, посвященных исследованиям малых тел Солнечной системы. На базе нашего Института мы организовали и провели две международные Рабочие группы: «Поляриметрия комет и астероидов» в 1997 г. и «Фотометрия и поляриметрия астероидов: импульс к сотрудничеству» в 2003 г., в которых приняли участие ученые из Украины, России, Азербайджана, Монголии, Польши, Италии, Японии. Несмотря на то, что наш отдел относительно молодой, в нем уже защищено семь кандидатских диссертаций и три докторские. Результаты исследований публикуются в журналах, трудах конференций, зарубежных монографиях, представляются на международных конференциях и включаются в международные базы

данных, в создании которых есть вклад и нашей группы. В результате, Харьковская группа получила широкое международное признание, о чем свидетельствует, в частности, название астероидов в честь ее сотрудников: 3210 Lupishko, 4208 Kiselev, 8786 Belskaya, 17034 Vasylishiev, 17035 Velichko и 17036 Krugly. Кроме того, в 2001 г. чешские коллеги Р. Правец и Л. Саронова из Онджеевской обсерватории назвали открытый ими астероид в честь всей нашей группы как признание ее заслуг в изучении астероидов. Это астероид 15898 Kharasterteam (сокращение от «Kharkov asteroid team»).

Отметим, что пять из перечисленных выше семи астероидов были названы астрономом Ловелловской обсерватории (Флагстафф, Аризона) Эдвардом Боуэллом – широко известным специалистом по обнаружению и изучению астероидов. Дружба и сотрудничество харьковских астрономов с Э.Боуэллом продолжается уже 20 лет, с тех пор, как в 1987 г. он назвал один из открытых им астероидов в честь первого автора этой статьи. Он трижды посещал Харьков и наш Институт, в том числе и в январе 2005 г. для презентации астероида «10685 Kharkivuniver», который он «подарил» нашему университету к его 200-летию юбилею. А ровно через год, по приглашению ректора ХНУ проф. Бакирова В. С., он снова посетил наш университет по случаю избрания его Почетным доктором Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина.

Среди других широко известных зарубежных ученых, с которыми установлено активное сотрудничество (совместные наблюдения, публикации, доклады на конференциях и пр.) – Р. Бинзел и А. Харрис\* (США), М. Ди Мартино\* и А. Челлино\* (Италия), А. Баруччи (Франция), К. Йокерс\* (Германия), С. Кикучи\* (Япония), Т. Михаловски\* (Польша), П. Правец (Чехия) и др. (отмеченные звездочкой посещали НИИ астрономии).

В заключение хочется отметить, что становление независимой Украины продолжается до сих пор и протекает весьма болезненно. Это не могло не сказаться на финансировании науки и ее состоянии, особенно в системе Министерства образования и науки. Из-за недостатка финансирования численность нашей группы (отдела) сократилась из 8-ми до 6 человек (в 2006 г. д.ф.-м.н. Н. Н. Киселев перешел на работу в ГАО НАНУ, к.ф.-м.н. В. Г. Шевченко по основной работе – на кафедру астрономии, а Т. А. Лупишко в 2003 г. – на пенсию). В этой ситуации трудно говорить о перспективах развития исследований нашей группы, как и всего НИИ астрономии. Можно только отметить, что среди ближайших наших задач стоит модернизация и автоматизация имеющегося телескопа АЗТ-8 и расширение взаимовыгодного сотрудничества с зарубежными коллегами с целью использования более мощных и современных средств наблюдений.

## Литература

- [1] *Harris A. W., Pravec P.* Rotational properties of asteroids, comets, and TNOs // In: *Asteroids, Comets, Meteors* (D. Lazzaro, S.F. Mello, J.A. Fernandez – eds.). Cambridge Univ. Press, UK. – 2006. – P. 439-447.
- [2] *Stuart J. S., Binzel R. P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // *Icarus*. – 2004. – V. 170, No. 2. – P. 295-311.
- [3] *Гафтонюк Н. М.* Периоды вращения и двойственность избранных астероидов. Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Симеиз, 2005. – 129 с. – (Машинопись).
- [4] *Dollfus A., Mandeville J.C., Duseaux M.* The nature of the M-type asteroids from optical polarimetry // *Icarus*. – 1979. – V. 37, No. 1. – P. 124 -132.
- [5] *Harris A.* Asteroid rotation. II. A theory for the collisional evolution of rotation rates // *Icarus*. – 1979. – V. 40, No. 1. – P. 145-153.
- [6] *Rivkin A. S., Howell E. S., Britt D. T. et al.* 3- $\mu$ m spectrophotometric survey of M- and E-class asteroids // *Icarus*. – 1995. – V. 117, No. 1. – P. 90-100.
- [7] *Rivkin A. S., Lebofsky L. A., Britt D. T., Howell E. S.* Three-micron survey of E- and M-class asteroids: final results // *Bull. Amer. Astron. Soc.* – 1997. – V. 29, No. 3 – P. 972-973.
- [8] *Busarev V. V.* Spectral features of M-asteroids: 75 Eurydike and 201 Penelope // *Icarus*. – 1998. – V. 131, No. 1. – P. 32-40.
- [9] *Thomas P. C., Binzel R. P., Gaffey M. J. et al.* Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble Space Telescope results // *Science*. – 1997. – V. 277. – P. 1492-1495.
- [10] *Degewij J., Tedesco E., Zellner B.* Albedo and color contrast on asteroid surfaces // *Icarus*. – 1979. – V. 40, No. 2. – P. 364-374.

- [11] *Tedesco E. F., Veeder G. J.* IMPS albedos and diameters catalog (FP 102) / IRAS Minor Planet Survey / Eds.: E.F.Tedesco, G.J.Veeder, J.W.Flower, Chillemi J.R. – Hanscom Air Force Base, MA (USA). – 1992. – P. 243-285.
- [12] *Lagerkvist C.-I., Piironen J., Erikson A.* Asteroid Photometric Catalogue. – 2002. Fifth Update, Uppsala Univ. Press, Uppsala.
- [13] *Levasseur-Regourd A.-C., Hadamcik E., Renard J. B.* Evidence for two classes of comets from their polarimetric properties at large phase angles // *Astron. Astrophys.* – 1996. – V. 313. – P. 327-333.
- [14] *Hadamcik E., Levasseur-Regourd A.Ch.* Imaging polarimetry of cometary dust: different comets and phase angles // *JQSRT.* – 2003. – V. 79-80. – P. 661-678.
- [15] *Лебединец В. Н.* О CHON-частицах в межпланетном пространстве // *Астрон. вестник.* – 1991. – Т. 25, № 1. – С. 65-70.
- [16] *Dollfus A.* Polarimetry of grains in the coma of P/Halley. II. Interpretation // *Astron. Astrophys.* – 1989. – V. 213. – P. 469-478.
- [17] *Mason C. G., Gehrz R. D., Jones T. J., et al.* Observations of unusually small dust grains in coma of comet Hale-Bopp C/1995 O1 // *Astrophys. J.* – 2001. – V. 549. – P. 635-646.
- [18] *Hainaut O. R., Delahodde C. E., Boehnhardt H. et al.* Physical properties of TNO 1996 TO66. Lightcurves and possible cometary activity // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 356. – P. 1076-1088.
- [19] *Lellouch, E., Moreno, R., Ortiz, J. L. et al.* Coordinated thermal and optical observations of transneptunian object (20000) Varuna from Sierra Nevada // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 391. – P. 1133-1139.